بررسی پارامتریک نورگیرها با هدف بهبود عملکرد روشنایی *

مهدی معرفت [۱]　　　　امیر کریم‌دوست‌یاسوری [۲]

چکیده *نورگیرها یا چاه‌های روشنایی به طور وسیعی در ساختمان‌های چند طبقه برای: روشنایی، تهویه و همین طور اتصال با محیط بیرون، مورد استفاده قرار می‌گیرند. از آن‌جا که آسمان، معمولاً در سمت الرأس نسبت به افق روشن‌تر است، نورگیرهای سقفی نسبت به پنجره‌های عمودی نور بیشتری را به داخل راه می‌دهند. برای طراحی مناسب روشنایی و معماری ساختمان، بررسی پارامتریک مؤلفه‌های تأثیرگذار در میزان نوری که وارد طبقات می‌شود، لازم به نظر می‌رسد. در این تحقیق برای یک نورگیر متداول در یک ساختمان چهارطبقه، به بررسی پارامترهای تأثیرگذار در میزان نور رسیده به طبقات پرداخته می‌شود. تضعیف نور در طبقات، تأثیر ضریب انعکاس دیوار چاه روشنایی، تأثیر ضریب انعکاس کف نورگیر و دیواره اطاق، تأثیر ابعاد نورگیر و وضعیت قرارگیری کلاهک نورگیر در ضریب روشنایی، در سه حالت: نورگیر چهارطرفه، نورگیر سه‌طرفه و نورگیر در گوشه در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته‌اند. استفاده از نتایج ارائه شده در این مقاله می‌توانند در بهبود طراحی و معماری از لحاظ میزان نور رسیده به طبقات ساختمان بسیار مؤثر باشد.*

واژه‌های کلیدی نورگیر، چاه روشنایی، نور روز، شدت روشنایی.

Parametric Study on Illumination Performance of Skylights for Daylighting Enhancement

M. Maerefat　　　　A. Karimdoost-Yasuri

Abstract *Light wells are extensively used in high-rise buildings as an integrated part of the building for daylighting. Since the solar illuminance is usually higher on horizontal surfaces than the vertical ones, roof skylights transmit more daylight than vertical windows. For proper design of daylighting, a parametric study on the effective parameters in daylighting is required. In this study, the effects of these parameters are investigated for a four-story building. Attenuation of the daylight in the floors, effects of reflectivity of the surfaces of the light well, as well as effects of the reflectivities of light well floor and room walls, effects of the dimensions of the skylight, and the slope of skylight to horizon have been studied,. The daylight factor for the three situations of the lightwell: four-sided, three-sided, and in the corner of the building have been obtained. The radiosity method or point by point algorithm has been used for daylighting calculations. Results of the present study can be used in improving the daylighting of the buildings.*

Key Words Skylight, Light well, Daylight, Illuminance.

---

* نسخه‌ی اول مقاله در تاریخ ۸۸/۱/۲٤ و نسخه‌ی نهایی آن در تاریخ ۸۸/۱۲/۱۸ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) دانشیار، گروه مکانیک، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

(۲) نویسنده‌ی مسئول، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه

گسترش روزافزون نیاز به انرژی، محدودیت منابع فسیلی، آلودگی محیطزیست، گرم شدن کره‌ی زمین و اثرات پدیده‌ی گلخانه‌ای، لزوم صرفه‌جویی در مصرف سوخت‌های فسیلی و توجه به انرژی‌های تجدیدپذیر را ضروری ساخته است[1]. امروزه انرژی زیادی صرف روشنایی فضاهای مسکونی و تجاری و حذف گرمای ناشی از سیستم‌های روشنایی می‌شود. استفاده از نور روز برای روشنایی، دارای فواید اقتصادی و زیست محیطی بسیاری است [2,3]. اکنون طراحی روشنایی در ساختمان‌ها، غیر از روش‌های تجربی، مبتنی بر قوانینی علمی است. مسأله‌ی در طراحی ساختمان برای بهره گرفتن از نور طبیعی، تعیین کردن مقداری از نور موجود در محیط بیرون است که انتظار می‌رود در یک موقعیت خاص به محیط داخل برسد که به عنوان ضریب روشنایی (daylight factor) روز معروف است. نورگیرها دارای توان بالقوه‌ای برای بهره‌گیری از نور روز برای روشنایی فضای داخلی ساختمان‌ها و صرفه-جویی در مصرف انرژی هستند [4].

عملکرد روشنایی در یک نورگیر (atrium) (چاه روشنایی) پیچیده بوده و به هندسه، ویژگی‌های دیوار، سطوح کف، طبیعت سقف و شیشه‌ی آن بستگی دارد.

کول (Cole) [5] در سال ۱۹۹۰ با استفاده از مدل، آزمایشاتی را بر روی اثرات تغییر مساحت شیشه‌ی پنجره‌ی دیواره‌ی نورگیر، با مقادیر ضریب روشنایی فضاهای مجاور نورگیر انجام داد؛ نتایج نشان داد که با افزایش تدریجی فضای شیشه‌ای به فضای انعکاسی به طرف طبقات پایین، ضریب روشنایی افزایش می‌یابد و ضریب انعکاس کف نورگیر، ضریب روشنایی طبقات پایین را به طور چشم‌گیری تحت تأثیر قرار می‌دهد. آل ترکی و شیلر (Al-Turki & Schiler) [6] در سال ۱۹۹۸، تحقیقاتی را در مورد عملکرد روشنایی در نورگیر، تحت شرایط آسمان صاف انجام دادند؛ نتایج نشان داد که یک نورگیر با مشخصه ابعاد ۱:۱:۲ برای نیمه‌ی بالایی طبقات، روشنایی کافی ایجاد می‌کند. لیتل فیر (Littlefair) [7] در سال ۲۰۰۳، تکنیک‌های منتشر شده‌ی متداول را برای محاسبه‌ی ضریب روشنایی میانگین بر روی پایه‌ی نورگیر، دیوارها و فضاهای مجاور، مرور کرد؛ از آن‌جا که بیشتر این فرمول‌های تحلیلی از نتایج تجربی به دست آمده بودند، بنابراین برای محدوده‌ای از شکل‌ها و ضرایب انعکاس‌های نورگیر، قابل کاربرد هستند. کالکلگنی و پارون سینی (Calcagni & Paroncicni) [8] در سال ۲۰۰٤ با استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری با رادیانس (radiance)، اثرات ضریب انعکاس دیواره‌ی نورگیر را بررسی و ضرایب روشنایی در فضاهای مجاور را به شکل فرمول‌هایی در ضرایب انعکاس مختلف ارائه کردند.

سمانت و مدژوب (Semant & Medjdoub) [9] در سال ۲۰۰۵ مقایسه‌ای بین یک مدل فیزیکی و روش رادیانس انجام دادند؛ نتایج نشان داد که روش رادیانس ضریب روشنایی را در مقایسه با مدل فیزیکی، کم‌تر تخمین می‌زند و مقادیر ضریب روشنایی رادیانس باید در یک ضریب ۱/۲ ضرب شوند. فریوان (Freewan) و هم‌کاران [4] در سال ۲۰۰۹ با استفاده از روش‌های تجربی با مدل و روش رادیانس تحقیقاتی را در زمینه‌ی هندسه‌ی سقف با نورگیر انجام دادند؛ نتایج نشان داد که کج کردن نورگیر در سقف، باعث کاهش میزان نور رسیده به داخل ساختمان می‌شود.

بیشتر تحقیقات قبلی، موارد محدودی از عوامل تأثیرگذار در میزان نور رسیده به طبقات را مورد بررسی قرار می‌دهند که عمدتاً برای ناحیه‌ی محدودی از شکل‌ها و ضرایب انعکاس نورگیر و هم‌چنین برای ساختمان‌هایی با معماری مدنظر این محققین، قابل کاربرد است.

در این تحقیق با استفاده از روش رادیوسیتی به بررسی اثر پارامترهای مختلف در میزان ضریب روشنایی رسیده به طبقات ساختمان از طریق یک نورگیر متداول در ساختمان‌های کشور پرداخته می‌شود.

از این پارامترها می‌توان به: ابعاد نورگیر، ابعاد چاه روشنایی، خواص انعکاسی سطوح دیوار و شیشه‌ی پنجره‌های طبقات، ابعاد پنجره‌ها، وضعیت کلاهک نورگیر و غیره اشاره کرد که در سه حالت: نورگیر چهارطرفه، نورگیر سه‌طرفه و نورگیر در گوشه و در محدوده‌ی وسیعی از ابعاد، شکل‌ها و ضرایب انعکاس سطوح، صورت گرفته است.

روشنایی از طریق نورگیر

یک نورگیر افقی به عنوان یک منبع نوری، تقریباً سه برابر یک پنجره‌ی عمودی، مؤثر است. نفوذ نور از پنجره‌ها به مسافت مشخصی از پنجره محدود بوده و با اضافه کردن پنجره بام (clerestory) به آن می‌توان نفوذ نور را در آن فضا افزایش داد؛ با این وجود هنوز هم غیریکنواختی در شدت روشنایی آن فضا وجود خواهد داشت، اما یک نورگیر با طراحی چاه‌های روشنایی (light well) مناسب، شدت روشنایی یکنواختی را در آن فضا، تأمین خواهد کرد. همچنین نورگیر، نور را در یک فضای مشخص، به طور یکنواخت‌تری انتقال می‌دهد و کم‌تر توسط موانع داخلی و خارجی مسدود می‌شود.

ضریب روشنایی روز. ضریب روشنایی روز به صورت نسبت شدت روشنایی روی سطحی معین و هم‌زمان شدت روشنایی در محیط بیرون روی سطحی افقی در محلی بدون مانع بیان می‌شود که توسط رابطه‌ی زیر تعیین می‌شود [10]:

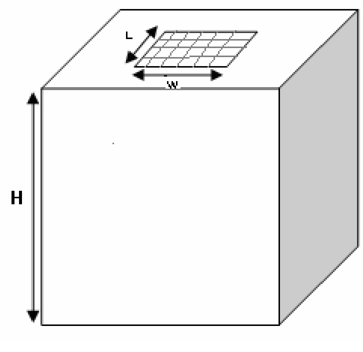
$$DF = \frac{E_i}{E_0} \times 100(\%) \qquad (1)$$

که در آن E_i، شدت روشنایی روی سطحی معین در داخل و E_0 هم‌زمان شدت روشنایی در محیط بیرون روی سطحی افقی در محلی بدون مانع می‌باشد. برای موقعیتی خاص، این ضریب، تحت تغییرات گسترده‌ی شرایط روشنایی بیرون، ثابت است. مقدار ضریب روشنایی، بسته به شرایط، هرچه بیشتر باشد، بهتر است؛ ولی مقدار توصیه شده برای کارهای بصری حدوداً ۱/۵ تا ۲ درصد و برای کارهای نسبتاً مشکل حدود ۲/۵ تا ٤ درصد است.

شکل چاه روشنایی. محوطه‌ی داخلی نورگیر که عموماً به شکل مکعب مستطیل می‌باشد به چاه روشنایی معروف است. عملکرد روشنایی یک چاه روشنایی، دقیقاً به نسبت هندسی آن وابسته است. شکل یک چاه روشنایی را می‌توان به وسیله‌ی یک عدد، شرح داد. مثلاً شاخص چاه (well index)، که رابطه‌ی بین سطح عبور نور و سطوح نورگیر را بیان می‌کند [8]:

$$wi = \frac{H(W+L)}{2WL} \qquad (2)$$

که در این عبارت؛ H، W و L، به ترتیب: ارتفاع، عرض و طول چاه روشنایی است. این پارامتر، اجازه می‌دهد که بین چندین شکل نورگیر مرتبط به یک ساختمان با ارتفاع معین، مقایسه صورت گیرد. مثلاً برای یک نورگیر با ارتفاع ثابت و سطح مقطع مربعی، wi با $\frac{H}{L}$ متناسب است؛ یعنی با افزایش ضلع نورگیر در یک ارتفاع ثابت، wi کاهش می‌یابد و در حالت کلی، افزایش wi به معنی عمیق‌تر شدن چاه یا کاسته شدن دهانه‌ی آن است. شماتیکی از یک ساختمان با چاه روشنایی در شکل (۱) نشان داده شده است.

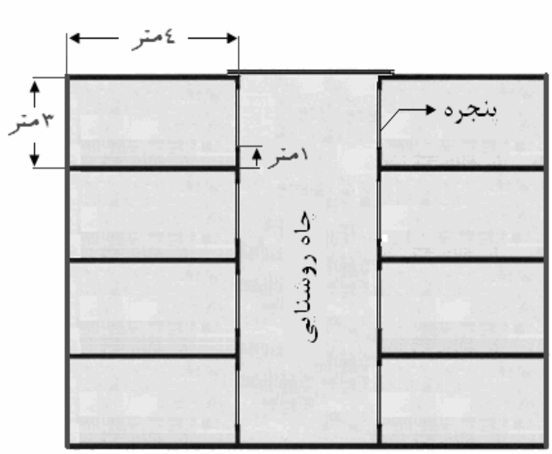


شکل ۱ شماتیکی از یک ساختمان با چاه روشنایی

تعریف مسأله

در این‌جا به تعریف مسأله و نمونه‌ی مورد بررسی برای محاسبات روشنایی پرداخته می‌شود.

برای محاسبات روشنایی، یک ساختمان چهارطبقه مطابق شکل (۲) با یک نورگیر که نور روز را از طریق چاه روشنایی و از طریق پنجره به فضاهای مجاور طبقات انتقال می‌دهد، در نظر گرفته شد. هدف، بررسی پارامتریک مؤلفه‌های تأثیرگذار در میزان نوری است که وارد طبقات ساختمان می‌شود.



شکل ۲ شماتیکی از ساختمان چهارطبقه با چاه روشنایی مورد بررسی

برای نمونه‌ی مورد بررسی، فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شود:

ارتفاع هر طبقه ۳ متر، عمق اتاق‌ها ٤ متر و پنجره‌ی هر طبقه در ارتفاع ۱متری از کف اتاق در نظر گرفته می‌شود. خواص انعکاسی همه سطوح پخشی بوده و محاسبات برای سه وضعیت قرارگیری نورگیر چهار طرفه، نورگیر سه‌طرفه و نورگیر در گوشه بر اساس ضریب روشنایی صورت می‌گیرد.

ضریب عبور نورگیر و پنجره‌ها: $\tau_g = 0.7$، ضریب انعکاس دیوار و سقف: $\rho_w = 0.8$ و ضریب انعکاس کف اتاق و نورگیر: $\rho_f = 0.3$ فرض شده است. پنجره‌های طبقات به ارتفاع ۱متر در نظر گرفته شده‌اند. نورگیر، مربعی بوده و ساختمان دارای ٤ طبقه است. منظور از ضریب روشنایی، ضریب روشنایی میانگین نقاط روی کف اتاق است.

استراتژی حل

همان‌طور که بیان شد، در این تحقیق از روشی موسوم به روش رادیوسیتی یا الگوریتم نقطه به نقطه برای محاسبه ضریب روشنایی استفاده می‌شود. در روش رادیوسیتی، سطوح به شبکه‌ای ازتکه‌های مجزا تقسیم می‌شود؛ با این فرض که هر تکه سطح، یک انعکاس دهنده‌ی لامبری (lambertian) است؛ یعنی دارای درخشندگی ثابت و مستقل از جهت است. شاری که هر تکه سطح را ترک می‌کند، به وسیله‌ی قانون کسینوس لامبر قابل محاسبه است؛ از این رو هر تکه سطح، نوری را دریافت کرده و سپس دوباره به فضا منعکس می‌کند. کل فرایند، تکراری است و تا جایی‌که همه شارهای منعکس شده جذب شوند، ادامه می‌یابد [11]. به طور خلاصه، این روش با فرض تعادل انرژی، محاسبه می‌کند که چقدر نور از یک سطح معین به علت تبادل انرژی با سطوح دیگر منعکس می‌شود. برای یک محفظه‌ی بسته با فرض تعادل انرژی می‌توان نوشت:

$$j_i dA_i = E_i dA_i + \rho_i \int_{A_j} F_{ij} j_j dA_j \quad (۳)$$

به طوری‌که j رادیوسیتی، E انرژی نوری گسیل شده بر واحد سطح بر واحد زمان، ρ ضریب انعکاس، F_{ij} ضریب دید، یعنی کسری از انرژی که سطح j را ترک کرده و به سطح i می‌رسد و A سطح مقطع است به علت تعادل انرژی، رابطه تقابل برقرار است:

$$F_{ij} dA_i = F_{ji} dA_j \quad (٤)$$

با اعمال آن به معادله‌ی (۳) و کمی ساده‌سازی، داریم:

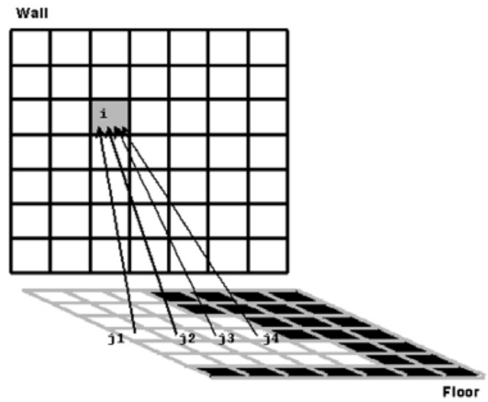
$$j_i = E_i + \rho_i \sum_{j=1}^{n} j_j F_{ji} \quad (۵)$$

رابطه‌ی اخیر به معادله‌ی رادیوسیتی معروف است که باید برای هر تکه سطح در مدل اعمال شود؛ بنابراین مدل به صورت کامل از حل N معادله‌ی N

مجهول در یک زمان، تحلیل می‌شود که در اصطلاح به روش رادیوسیتی ماتریس کامل (full matrix) موسوم است:

$$\begin{bmatrix} 1-\rho_1 F_{11} & -\rho_1 F_{12} & \dots & -\rho_1 F_{1n} \\ -\rho_2 F_{21} & 1-\rho_2 F_{22} & \dots & -\rho_2 F_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\rho_n F_{n1} & -\rho_n F_{n2} & \dots & 1-\rho_n F_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j_1 \\ j_2 \\ \dots \\ j_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \dots \\ E_n \end{bmatrix} \qquad (٦)$$

E_i معمولاً صفر است (مگر تکه‌هایی از سطح که نور مرئی گسیل می‌کنند). در رابطه‌ی بالا، مجهولات رادیوسیتی تکه‌های سطح بوده که با حل آن، رادیوسیتی برای تمام تکه‌های سطح به دست می‌آید.



شکل ۳ مجموع انعکاس وارده آمده برای یک المان [12]

بعد از به دست آمدن رادیوسیتی تمام سطوح، می‌توان شدت روشنایی در هر نقطه مشخص داخل محفظه را با استفاده از رابطه‌ی (۷) در زیر به دست آورد [11]:

$$H_p = \sum_{j=1}^{N} j_j F_{p-j} \qquad (۷)$$

در این رابطه، H_p شدت روشنایی در نقطه‌ی p بوده و F_{p-j} ضریب دید دیفرانسیلی نقطه p نسبت به تکه سطح j است که با استفاده از روابطی که در مرجع [11] آمده، قابل محاسبه است. روند حل مسأله به این ترتیب است که ابتدا نوری که از طریق نورگیر وارد چاه روشنایی می‌شود، محاسبه می‌گردد.

برای نورگیر افقی:

$$J_{skylight-h} = \tau(q_{sky} + q_{sun}\cos\theta_s) \qquad (۸)$$

برای نورگیر عمودی:

$$J_{skylight-v} = \tau(q_{sky} + q_{sun}\sin\theta_s) \qquad (۹)$$

که $J_{skylight}$ رادیوسیتی نورگیر، q_{sky} شدت روشنایی آسمان، q_{sun} شدت تشعشع مستقیم نور خورشید و θ_s زاویه تابش پرتوهای خورشید با خط عمود (زاویه سمت‌الرأس) است. سپس سطح داخلی نورگیر به المان‌های مختلف تقسیم شده و ضرایب دید کلیه سطوح نسبت به هم‌دیگر محاسبه می‌شوند [11]. در ادامه با استفاده از رابطه‌ی (۵) معادله‌ی رادیوسیتی را برای کلیه سطوح مجزای ممکن نوشته، N معادله‌ی N مجهول حاصل را حل کرده، بدین ترتیب رادیوسیتی کلیه‌ی بخش‌ها به دست می‌آید. سپس می‌توان با استفاده از رابطه‌ی زیر، رادیوسیتی شیشه‌های پنجره طبقات را به دست آورد:

$$J_{win-in} = \frac{1-\rho}{\rho} J_{win-out} \qquad (۱۰)$$

که J_{win-in} و $J_{win-out}$ به ترتیب، رادیوسیتی شیشه‌های پنجره رو به داخل اتاق و رو به نورگیر بوده و ρ ضریب انعکاس شیشه پنجره می‌باشد. در ادامه، روند قبل برای بخش‌های داخل اتاق تکرار شده و رادیوسیتی کلیه‌ی سطوح مجزا به دست می‌آید. روش حل، بدین ترتیب است که با شروع از مقادیر اولیه‌ی حدسی برای رادیوسیتی های مجهول و روش حل تکراری گاوس- سایدل، می‌توان به طور متوسط بعد از ۵۰ تکرار به جواب رسید؛ البته این مقدار تکرار برای ابعاد مختلف نورگیر بین ۲۵ تا ۱۳۰ تکرار تغییر می‌کند (تعداد تکرارها از مرتبه‌ی سه فراتر نمی‌رود). از لحاظ

زمانی این مقدار تکرار در کم‌تر از یک دقیقه صورت می‌گیرد. از شرط هم‌گرایی باقیمانده برای معیار هم‌گرایی استفاده می‌شود؛ یعنی میانگین اختلاف رادیوسیتی‌های دو تکرار متوالی باید کم‌تر از مقدار کوچکی مثل ε شود. در نهایت می‌توان با استفاده رادیوسیتی‌های فوق‌الذکر و رابطه‌ی (۷)، شدت روشنایی در هر نقطه از کف اتاق را به دست آورد.

نتایج

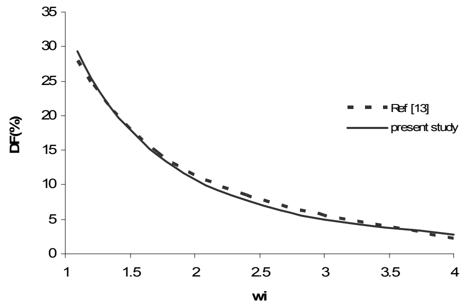
در این بخش ابتدا از صحت نتایج، اطمینان حاصل می‌شود که به صورت مقایسه‌ی نتایج تحقیقات تجربی و عددی دیگر محققان با این تحقیق است.

اعتبارسنجی نتایج. اغلب محققان، میزان ضریب روشنایی در کف نورگیر را بر پایه‌ی شبیه‌سازی کامپیوتری و یا مدل فیزیکی و به صورت تجربی به دست آورده‌اند که برخی از نتایج آن‌ها با تحقیق حاضر در زیر، مورد مقایسه قرار می‌گیرد:

لئوادی (Laouadi) و عطیف (Atif) [13] از شبیه‌سازی کامپیوتر برای استخراج یک چند جمله‌ای رگرسیون به صورت تابعی از wi استفاده کردند که ضریب روشنایی در مرکز کف یک نورگیر را می‌دهد. ضرایب انعکاس دیوار و کف به ترتیب ۰/۴۵ و ۰/۲ در نظر گرفته شد. فرمول پیشنهادی آن‌ها به صورت زیر بود:

$$DF_{cf} = 103.56 - 121.09wi + 64.203wi^2 - 17.61wi^3 + 2.393wi^4 - 0.1267wi^5 \quad (۱۱)$$

برای مقایسه‌ی تحقیق حاضر با نتایج فرمول روش بالا، ضریب روشنایی مرکز کف نورگیر(با ارتفاع ثابت) در اضلاع مختلف چاه روشنایی مربعی(در این حالت $wi = H/L$) محاسبه شد. نمودار شکل (۴) مقایسه‌ی نتیجه‌ی پژوهش حاضر با فرمول رگرسیون لئوادی و عطیف را نشان می‌دهد.

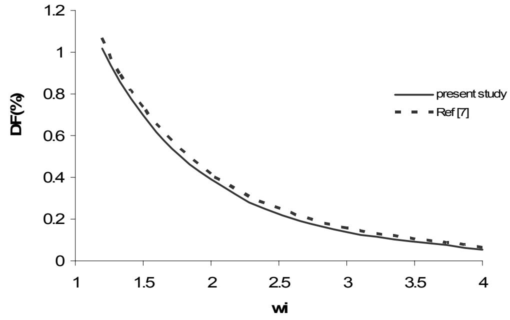


شکل ٤ مقایسه روش تحقیق حاضر با مرجع [13]

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مطابقت خوبی بین نتایج روش تحقیق حاضر و روش لئوادی و عطیف وجود دارد. مقایسه‌ی بعدی به ضریب روشنایی میانگین در فضاهای مجاور نورگیر (اتاق‌های طبقات) مربوط است که لیتل فیر برای آن فرمول تحلیلی زیر را ارائه کرده‌است [7]:

$$DF_{av} = \frac{2A_w T_s DF_v}{A_s(1-R_s^2)} \quad (۱۲)$$

A_w؛ سطح خالص شیشه‌ی پنجره‌ی طبقه بر حسب مترمربع، T_s؛ ضریب عبور نور پخشی شیشه، A_s؛ مساحت کل سطوح اتاق بر حسب متر مربع، R_s؛ ضریب انعکاس میانگین اتاق و DF_v؛ ضریب روشنایی میانگین روی شیشه‌ی پنجره‌ی اتاق است. برای مقایسه در wi های مختلف در این حالت نیز همانند حالت قبل عمل شد. در زیر برای طبقه‌ی اول، مقایسه روش حاضر با فرمول مذکور آمده است:



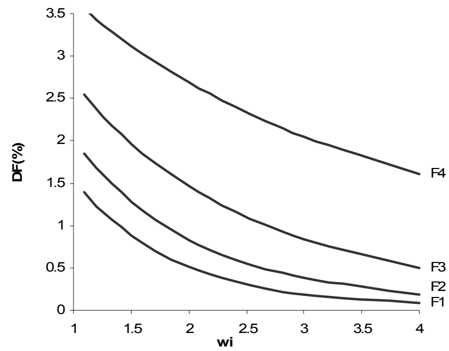
شکل ٥ مقایسه روش تحقیق حاضر با مرجع [7]

همان‌طور که مشاهده می‌شود، بین مقادیر محاسبه شده‌ی این دو تحقیق، تفاوت اندکی وجود دارد.

نتایج و بحث

تأثیر ضرایب انعکاس سطوح در رابطه‌ی (۵)، تأثیر ضریب عبور شیشه (برای شیشه‌ها فرض می‌شود: $\tau=1-\rho$) در رابطه‌ی (۹) و رابطه‌ی (۱۰) و در نهایت، تأثیر ابعاد در ضرایب دید رابطه‌ی (۵) وارد شده است. ابتدا وضعیت نورگیر در مرکز ساختمان و به صورت چهارطرفه مطابق شکل (۱) در نظر گرفته می‌شود.

تضعیف نور در طبقات. برای یک نورگیر با ارتفاع ثابت و سطح مقطع مربعی، wi با $\frac{H}{L}$ متناسب است که H و L به ترتیب، ارتفاع و ضلع نورگیر است. هدف در این قسمت، به دست آوردن تابعیت تضعیف (attenuation) ضریب روشنایی به طبقات و همین‌طور روند تغییرات ضریب روشنایی نسبت به ابعاد نورگیر است. در شکل زیر، ضریب روشنایی برای اتاق‌های هر طبقه به صورت تابعی از wi رسم شده است که Fn اتاق طبقه‌ی n ام را نشان می‌دهد.



شکل ٦ ضریب روشنایی میانگین طبقات نسبت به شاخص چاه برای نورگیر

مشاهده می‌شود که ضریب روشنایی نسبت به فاصله از نورگیر در اتاق‌های طبقات، به صورت نمایی کاهش می‌یابد. در جدول زیر توابع رگرسیون (curve fitting) ضریب روشنایی برای هر طبقه آمده است.

جدول ۱ معادله خط روند برای ضریب روشنایی نسبت به شاخص چاه

طبقه	معادله خط روند (trendline/regression equation)	ضریب تعیین (coefficient of determination) (R^2)
۱	$DF = 4.03e^{-1.0015wi}$	۰/۹۹۷
۲	$DF = 4.36e^{-0.8096wi}$	۰/۹۹۹
۳	$DF = 4.64e^{-0.5662wi}$	۰/۹۹۹
٤	$DF = 4.76e^{-0.2776wi}$	۰/۹۹۷

در ستون سوم جدول(۱) مقادیر ضریب تعیین آمده است. این عدد که در محدوده‌ی ۰ تا ۱ تغییر می‌کند، به این معنی است که تابع رگرسیون به داده‌های حاصل از نتایج عددی، چقدر نزدیک است. هرچه این عدد به ۱ نزدیک‌تر باشد به این معنی است که مقادیر عددی تابع قوی از منحنی رگرسیون هستند. از آن‌جا که این مقادیر به عدد یک بسیار نزدیک هستند، می‌توان نتیجه گرفت که روند تغییرات ضریب روشنایی نسبت به wi (یعنی $\frac{H}{L}$) نمایی است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش ضلع نورگیر، میزان ضریب روشنایی میانگین در هر طبقه به شدت افزایش می‌یابد. از معادلات خط روند جدول(۱) می‌توان ضریب روشنایی میانگین در هر طبقه را به صورت رابطه‌ی زیر نوشت:

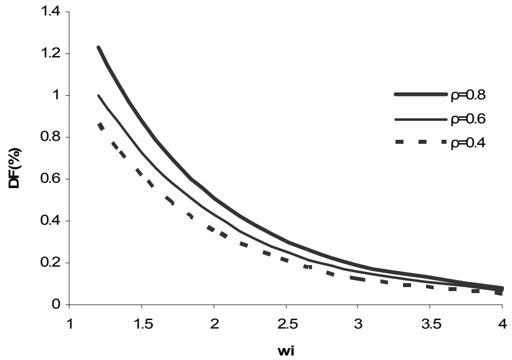
$$DF = DF_0 \times e^{-A\times wi} \quad (۱۳)$$

که اگر مقادیر DF_0 و A جدول (۱) به صورت تابعی از n (شماره‌ی طبقه) نوشته شوند، ثابت‌های: DF_0 و A به صورت: $DF_0 = 0.247n + 3.83$ و: $A = -0.241n + 1.26$ به دست می‌آید.

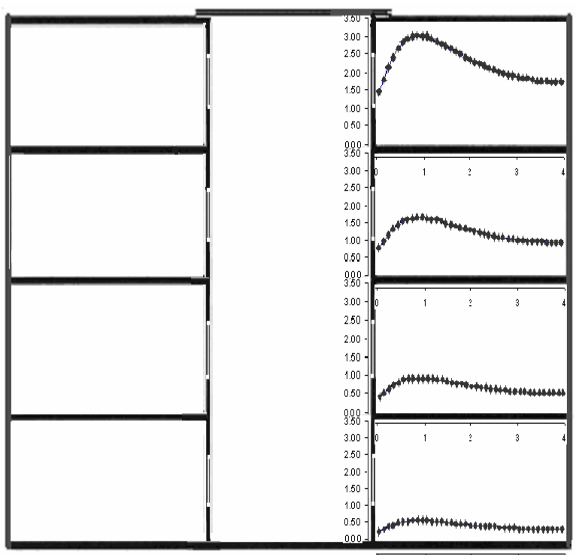
در شکل زیر، ضریب روشنایی قسمت میانی اتاق(DF(x,3)) برای هر طبقه با مشخصه‌ی ضلع نورگیر۶ متر رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ماکزیمم ضریب روشنایی در همه‌ی طبقات در فاصله‌ی حدود ۰/۸ متری از پنجره اتفاق می‌افتد.

تأثیر ضریب انعکاس سطوح دیوار. این تأثیر می‌تواند از دو ناحیه‌ی: سطوح دیوار اتاق و سطوح دیوار چاه روشنایی باشد که به طور جداگانه بررسی می‌شود.

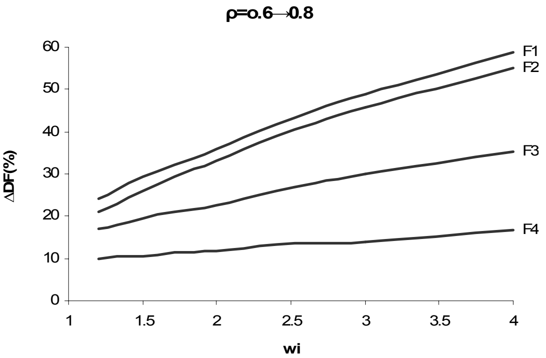
از آن‌جا که برای همه طبقات تأثیر ضریب انعکاس دیوار اتاق یکسان است، این حالت برای یکی از طبقات، مورد بررسی قرار می‌گیرد. ضریب روشنایی اتاق‌های طبقه‌ی اول در ضرایب انعکاس ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ دیوار اتاق در شکل (۷) نشان داده شده است.



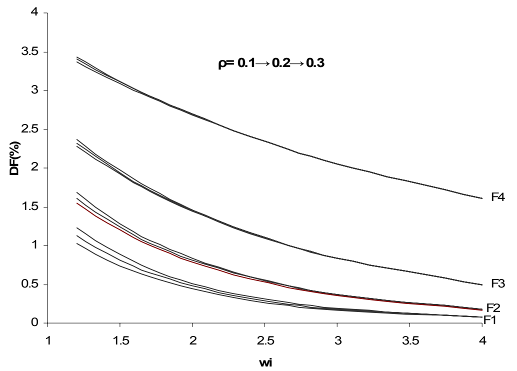
شکل ۷ تأثیر ضریب انعکاس دیوارهای داخلی اتاق(طبقه‌ی اول)



شکل ۸ تضعیف نور در طبقات ساختمان؛ ضریب روشنایی قسمت میانی اتاق(DF(x,3))



شکل ۹ تأثیر افزایش ضریب انعکاس دیواره چاه در میزان درصد افزایش ضریب روشنایی در wi های مختلف



شکل ۱۰ تأثیر ضریب انعکاس کف نورگیر در ضریب روشنایی طبقات ساختمان، برای هر طبقه از پایین به بالا ضریب انعکاس افزایش می‌یابد

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش ضریب انعکاس دیوارهای اتاق از ۰/٤ به ۰/٦ (۵۰٪ افزایش) میزان افزایش ضریب روشنایی میانگین اتاق در تمام طبقات به میزان ۲۰٪ و افزایش ضریب انعکاس دیوارهای اتاق از ۰/٦ به ۰/۸ (۳۳٪ افزایش) افزایشی برابر ۱۹٪ را باعث می‌شود. می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ضریب انعکاس دیواره‌های اتاق، ضریب روشنایی به شدت افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ضریب انعکاس، ضریب روشنایی به صورت نمائی افزایش می‌یابد.

از آن‌جا که میزان افزایش ضریب روشنایی در ازای افزایش ضریب انعکاس دیواره چاه روشنایی برای همه‌ی طبقات یکی نیست؛ در نتیجه درصد میزان افزایش ضریب روشنایی، نسبت به ضریب انعکاس در wi های مختلف بررسی شد که در شکل (۹) نشان داده شده است.

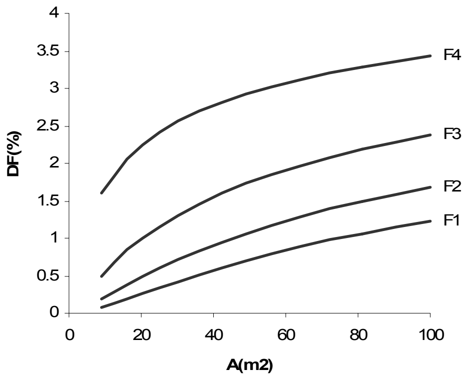
روند تغییرات افزایش ضریب روشنایی با افزایش ضریب انعکاس دیواره‌ی چاه، نشان می‌دهد که تأثیر ضریب انعکاس در افزایش ضریب روشنایی در همه‌ی طبقات در ابعاد کوچک‌تر نورگیر بیشتر است و این افزایش، خطی بوده که شیب آن در طبقات پایین‌تر بیشتر است، ثانیاً در یک ضلع مشخص نورگیر، درصد میزان افزایش ضریب روشنایی نسبت به ضریب انعکاس در طبقات پایین‌تر بیشتر است که به علت تأثیر انعکاس کف نورگیر قابل توجیه است.

تأثیر ضریب انعکاس کف نورگیر. ضـریب انعکـاس متعارف کف نورگیر به علت اثرات چشم‌زدگی (glare) معمولاً ۰/۲ تـا ۰/۳ اسـت. بـه نظـر مـی‌رسـد ضـریب انعکاس کف نورگیر تأثیر زیـادی در ضـریب روشـنایی طبقات پایین داشته باشد. ضریب روشـنایی طبقـات، در ضـرایب انعکـاس کـف ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳، در wi هـای متفاوت در زیر آمده است:

همان‌طور که مشاهده می‌شـود، اولاً بـرای تمـام طبقات، میـزان افـزایش ضـریب روشـنایی در wi هـای کوچک‌تر (ابعاد بزرگتر نورگیر)، بیشتر است که به علت بزرگتر شدن سطح انعکاسی کف نورگیر در این حالـت، قابل توجیه است؛ ثانیاً همان‌طور که انتظار می‌رود میزان افزایش ضریب روشنایی نسبت به ضـریب انعکـاس در طبقات پایین‌تر بیشتر است؛ بـه طـوری‌کـه بـا افـزایش ضریب انعکـاس کـف نـورگیر از ۰/۱بـه ۰/۳، ضـریب روشنایی به طور متوسط در طبقـه‌ی: اول، دوم، سـوم و چهارم، به ترتیب:۲۰٪، ۸٪، ٤٪ و ۱/۵٪ افزایش می‌یابد.

تأثیر ابعاد نورگیر بر میزان ضریب روشـنایی. الـف) برای یک سطح مشخص از نورگیر: ابتدا برای یک سطح مشخص از نورگیر، دو حالت سطح مقطـع مـستطیلی و حالت مربعی در نظر گرفته می‌شود. نتایج نشان می‌دهـد که در یک سطح مشخص از نورگیر، طبقات قرار گرفته در راسـتای ضـلع بزرگتـر نـورگیر، ضـریب روشـنایی بیشتری خواهنـد داشـت، ولـی در حالـت کلـی حالـت مربعی به غیـر از طبقـه‌ی بـالا در بقیـه‌ی طبقـات، نـور بیشتری را انتقال می‌دهد.

ب) برای سـطوح مختلـف نـورگیر: همـان‌طـور کـه در شکل (٦) نشان داده شد، ضریب روشـنایی میـانگین در طبقات با کاهش wi (افزایش ضلع نورگیر) بـه صـورت نمائی افزایش می‌یابد. در این حالت همان‌طور که دیـده می‌شود، میزان افزایش ضریب روشنایی با افزایش سطح نورگیر برای طبقات بالاتر، بیشتر است.



شکل ۱۱ تأثیر سطح نورگیر روی ضریب روشنایی

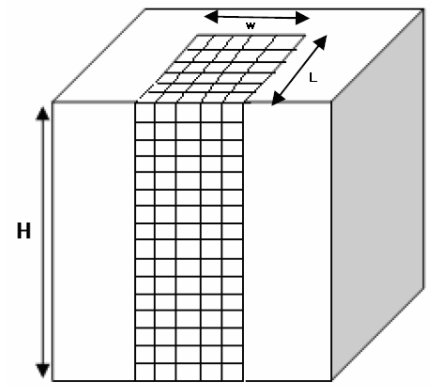
تأثیر ضریب عبور شیشه پنجـره‌هـا. در ایـن حالـت، نتایج نشان می‌دهد که: اولاً برای تمام طبقـات، ضـریب عبور شیشه‌ی پنجره برای ابعاد بزرگتر نورگیر (wi های کوچک‌تر) تأثیر بیشتری دارد، ثانیاً بـا افـزایش ضـریب عبور شیشه پنجره‌ها، میـزان ضـریب روشـنایی طبقـات تقریباً به طور خطی افزایش می‌یابد؛ به این ترتیب که با افزایش ضریب عبور شیشه‌ی پنجره‌ی طبقات از ۰/۷ به ۰/۹، (۲۸٪ افـزایش ضـریب عبـور)، میـزان ضـریب روشنایی طبقات به طور متوسـط در طبقـات: اول، دوم، سوم و چهارم، به ترتیب: ۹٪، ۱۰٪، ۱٤٪ و ۱۹٪ افزایش می‌یابد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفـت کـه میـزان تـأثیر ضریب عبور شیشه پنجره در مقدار ضریب روشنایی در طبقات بالاتر، بیشتر است.

نورگیر در حالت سه‌طرفـه. در شـکل (۱۲) نمـائی از ساختمان با نورگیر سه‌طرفه نشان داده شده است در این حالت، نـور مـی‌توانـد بـه طبقـات کنـاری (طبقـات در راستای L) و طبقات پشتی(طبقات در راستای w) برسد.

نتایج به دست آمده در این حالت، نشان می‌دهد که:

۱- ضریب روشنایی اتاق پشتی، متـأثر از بعـد راسـتای طولی پنجره طبقات است (بعـد w نـورگیر) کـه بـا بزرگتر بودن آن در یک مساحت مشخص، ضـریب روشنایی در تمام طبقات افزایش می‌یابد.

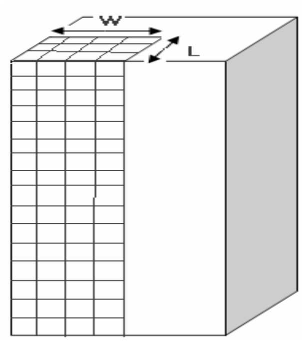
۲- میزان افزایش ضریب روشنایی با افزایش ضریب انعکاس برای اتاق‌های پشتی در مقایسه با اتاق‌های کناری بیشتر است.



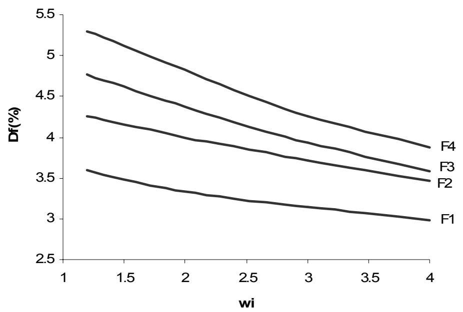
شکل ۱۲ نمایی از ساختمان با نورگیر سه‌طرفه

نورگیر در گوشه. در این بخش، حالت دیگری از وضعیت نورگیر مورد بررسی قرار گرفته است که در شکل (۱۳) نمایی از آن‌را می‌بینید. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اتاق‌های طبقات کناری و پشتی نورگیر می‌توانند از نور روز از طریق این نورگیر بهره‌مند شوند.

شکل زیر ضریب روشنایی در ابعاد مختلف نورگیر را نشان می‌دهد؛

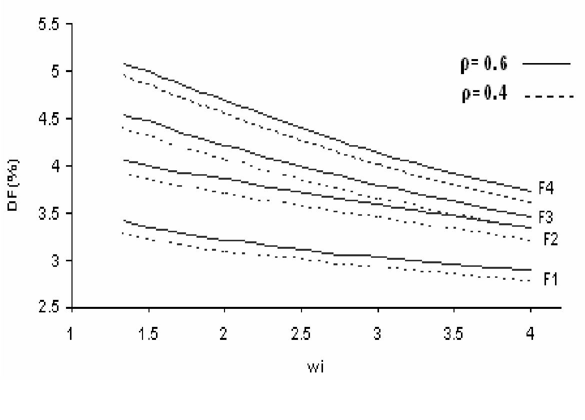


شکل ۱۳ شماتیکی از نورگیر در گوشه



شکل ۱۴ ضریب روشنایی در ابعاد مختلف نورگیر در حالت نورگیر در گوشه

مقایسه‌ی ضریب روشنایی اتاق‌های طبقات در این حالت با حالت‌های قبلی نشان می‌دهد به علت پوشش نوری وسیع از طریق نورگیرهای عمودی، میزان نوری که به طبقات می‌رسد، افزایش چشم‌گیری داشته است. بر خلاف حالت نورگیر چهار طرفه، با افزایش ضلع نورگیر در این حالت، میزان ضریب روشنایی در طبقات به صورت خطی افزایش می‌یابد. در شکل زیر تأثیر ضریب انعکاس سطوح دیواره‌ی چاه و تأثیر ابعاد چاه در میزان نور رسیده به طبقات مختلف آمده است؛

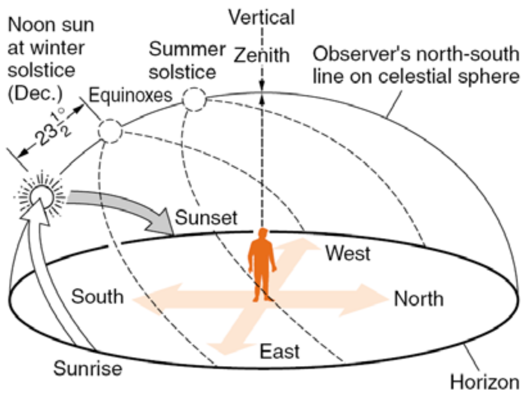


شکل ۱۵ تأثیر ضریب انعکاس دیواره چاه در تراز نوری طبقات

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ضریب انعکاس دیواره‌ی چاه از ۰/۴ به ۰/۶ میزان افزایش ضریب روشنایی در طبقات پایین‌تر، بیشتر بوده و تأثیر بیشتر آن

برای طبقات بالایی در ابعاد کوچکتر نورگیر و برای طبقات پایینی در ابعاد بزرگتر نورگیر است.

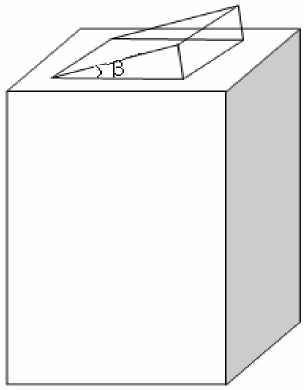
بررسی وضعیت کلاهک نورگیر. حال که بررسی پارامتریک محوطه‌ی داخلی نورگیر به اتمام رسید، مطالعه بر روی کلاهک نورگیر در انتقال هر چه بیشتر نور به سطح ورودی نورگیر متمرکز می‌شود. همان‌طور که در شکل (١٦) نشان داده شده است، در نیمکره‌ی شمالی، خورشید نسبت به سمت الرأس در جهت جنوبی طی مسیر می‌کند (زمین حرکت می‌کند ولی بهتر است برای فهم بهتر، حرکت به خورشید نسبت داده شود).



شکل ١٦ کره‌ی سماوی برای شخصی در نیمکره‌ی شمالی و مسیر حرکت خورشید

به نظر می‌رسد اگر تمایل کلاهک نورگیر به سمت خورشید باشد، نور بیشتری را وارد محیط نورگیر خواهد کرد. در این بخش سه وضعیت مختلف برای بررسی تأثیر شیب کلاهک نورگیر و وضعیت قرارگیری آن در انتقال نور به دهانه‌ی ورودی نورگیر، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

حالت اول- فرض می‌شود کلاهک نورگیر در سقف ساختمان با شیب دهانه‌ی β در سمت جنوب به شمال قرار دارد؛

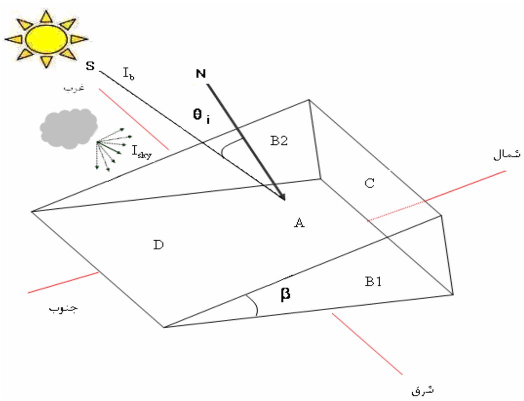


شکل ١٧ شماتیکی از وضعیت قرارگیری کلاهک(حالت اول)

هدف، محاسبه‌ی شیب کلاهک نورگیر است؛ به طوری‌که بیشترین میزان نور در طول سال، وارد محیط نورگیر شود. با فرض آسمان صاف، شدت روشنایی کلی در هر لحظه از زمان، در هر نقطه‌ای به صورت مجموع جزء‌های نور مستقیم و پخشی زیر، قابل بیان است:

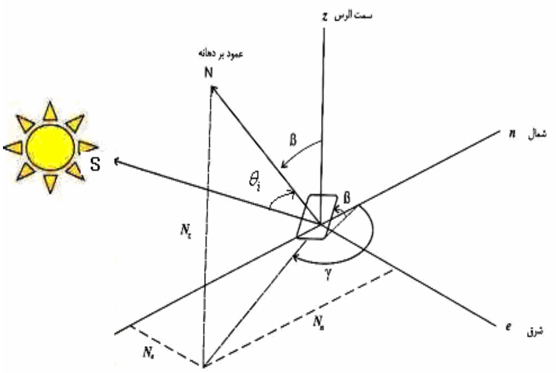
$$I_t = I_b \cos\theta_i + I_{sky} \qquad (١٤)$$

که در آن I_b و I_{sky} به ترتیب؛ شدت نور مستقیم و پخشی و θ_i؛ زاویه‌ی بین بردار یکه امتداد شعاع مرکزی خورشید (یعنی S) و بردار یکه عمود بر سطح نورگیر (یعنی N) است.



شکل ١٨ شماتیکی از وضعیت مؤلفه‌های نور نسبت به کلاهک

برای سطح C، دو حالت شیشه با ضریب عبور ۰/۷ و دیوار انعکاسی با ضریب انعکاس ۰/۸ مورد بررسی قرار می‌گیرد. اگر سطح C شیشه باشد، به علت قرارگیری در سمت شمال، فقط مؤلفه پخشی شدت نور آسمان را می‌گیرد؛ ولی در حالتی که دیوار باشد، در انعکاس‌های داخلی شرکت خواهد کرد. سطوح B1، B2 و D، علاوه بر شدت نور پخشی، تحت تأثیر نور مستقیم خورشید نیز قرار می‌گیرند؛ بنابراین لازم است برای در نظر گرفتن نور مستقیم، $\cos\theta_i$ برای این صفحات محاسبه شود؛ بدین منظور برای حالت کلی یک سطح شیبدار با شیب β و زاویه‌ی سمت γ، مطابق شکل (۱۹) در نظر گرفته می‌شود تا مقدار $\cos\theta_i$ برای همه‌ی سطوح قابل محاسبه باشد؛



شکل ۱۹ نحوه‌ی قرارگیری سطوح کلاهک نورگیر: در این شکل بردار یکه عمود بر سطح و بردار یکه شعاع مرکزی خورشید نیز نشان داده شده است

برای سطوح نورگیر در شکل بالا می‌توان $\cos\theta_i$ را به صورت رابطه‌ی (۱۵) نوشت [۱٤]:

$$\cos\theta_i = \cos\beta(\sin\delta\sin\phi+\cos\delta\cos\phi\cos\omega)+ \cos\delta\sin\omega\sin\beta\sin\gamma+ \sin\beta\cos\gamma(\sin\delta\cos\phi-\cos\delta\cos\omega\sin\phi) \quad (۱۵)$$

که در آن β شیب کلاهک، δ زاویه‌ی انحراف زمین، ϕ عرض جغرافیایی، ω زاویه‌ی ساعت و γ زاویه‌ی سمت نورگیر است. در جدول زیر زوایای سمت (γ) و شیب (β) برای سطوح B1، B2 و D آمده است:

جدول ۲ مقادیر زاویه سمت و شیب سطوح کلاهک نورگیر

سطح	زاویه سمت(γ)	شیب
B1	90^0	90^0
B2	270^0	90^0
D	180^0	β

با استفاده از معادله‌ی (۱۲) و جدول (۲)، $\cos\theta_i$ برای سطوح B1، B2 و D قابل محاسبه است:

برای سطح B1: $\gamma=\beta=90^0$

$$\cos\theta_i = \cos\delta\sin\omega \quad (۱٦)$$

برای سطح B2: $\gamma=270^0\ ,\ \beta=90^0$

$$\cos\theta_i = -\cos\delta\sin\omega \quad (۱۷)$$

و برای سطح D: $\gamma=180^o$ به صورت زیر خلاصه می‌شود:

$$\cos\theta_i = \cos\beta(\sin\delta\sin\phi+\cos\delta\cos\phi\cos\omega)- \sin\beta(\sin\delta\cos\phi-\cos\delta\cos\omega\sin\phi) \quad (۱۸)$$

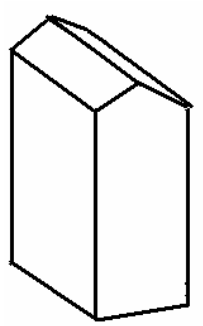
با داشتن مقادیر I_b و I_{sky} از روابط تجربی[۱٤] و مقدار $\cos\theta_i$ از روابط بالا، می‌توان شدت روشنایی کلی را برای سطوح کلاهک نورگیر به کمک رابطه‌ی (۱۲) به دست آورد. در نهایت می‌توان با در نظر گرفتن یک محفظه‌ی بسته برای کلاهک نورگیر، شدت روشنایی کلی بر روی سطح A کلاهک را طبق رابطه‌ی (۷) محاسبه کرد که در آن ضرایب دید سطوح از مراجع [11,15] محاسبه شده‌اند.

محاسبات در این حالت نشان می‌دهد که شـدت روشنایی کلی (نور مستقیم و نور پخشی) که بـه داخـل نورگیر می‌رسد، در شیب کلاهـک صـفر درجـه بیـشتر است و تغییر جنس سطح C بـه دیـوار انعکاسـی تـأثیر چندانی در نتیجه ایجاد نمی‌کند؛ از طرف دیگر در نظـر گرفتن شیب برای کلاهک نورگیر، باعث کاهش شـدت نور رسیده به آن می‌شود. در جدول (۳)، میـزان کـاهش شدت نور رسیده به دهانه‌ی نورگیری که با زاویـه‌ی ۳۰ درجه (تقریباً معادل عرض جغرافیایی تهران) نسبت بـه افق قرار دارد، نسبت بـه حالـت افقـی در عـرض‌هـای جغرافیایی مختلف آمده است:

جدول ۳ میزان کاهش ضریب روشنایی نورگیر با شیب ۳۰ درجه نسبت به حالت نورگیر افقی

عرض جغرافیایی	٦٠	٥٠	٤٠	٣٠	٢٠	١٠
درصد کاهش	٪١٧	٪٢٠	٪٢٣	٪٢٥	٪٢٨	٪٣٠

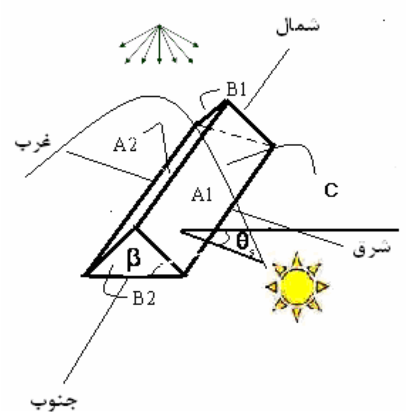
حالت دوم- نمونـه‌ی دیگـری از کلاهـک کـه در ایـن قسمت مورد بررسی قرار گرفته اسـت، در شـکل (۲۰) نشان داده شده است:



شکل ۲۰ شماتیکی از کلاهک نورگیر خطی(حالت دوم)

در شکل (۲۱) وضعیت صفحات نورگیر نـسبت به جهت حرکت خورشید و مشخصه‌های نور مستقیم و پخشی آمده است.

برای سطوح B1 و B2، دو حالت می‌توان در نظر گرفت: برای حالت اول، شیشه با ضـریب عبـور ۰/۷ و حالـت دوم، دیـوار بـا ضـریب انعکـاس ۰/۸ (ضـریب انعکاس متعارف برای دیوار از جنس گچ) در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۲۱ شماتیکی از وضعیت مؤلفه‌های نور نسبت به کلاهک

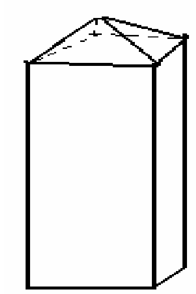
محاسبات برای سطح مقطـع C ثابـت بـا نـسبت طول به عرض ۲ انجام می‌گیرد. روند حل، مثـل حالـت قبل است. محاسبات در این حالت نـشان مـی‌دهـد کـه برای هردو جنس شیـشه و دیـوار، بـرای سـطوح B1 و B2، بیشترین میزان نـور در حالـت شـیب افقـی (صـفر درجه) کلاهک نورگیر به دهانه‌ی ورودی آن (سطح C) می‌رسد. این مقوله به این ترتیب قابل توجیه اسـت کـه بیشترین میزان نور مستقیم خورشید در بالاترین ارتفـاع تراز خورشید (ظهر خورشـیدی) رخ مـی‌دهـد و بـرای این‌که در این حالـت بیـشترین میـزان نـور بـه دهانـه‌ی ورودی نورگیر برسد، باید امتداد نور مستقیم خورشید و خط نرمال روی سطح کلاهـک یکـی باشـد. در نتیجـه برای دریافت بیشترین میزان نور در این زمان‌ها، نـاگزیر باید سطح مسطح کلاهک به طرف خورشـید باشـد کـه حالت افقی آن به این وضعیت نزدیک است.

در جدول (٤) میزان کاهش شدت نور رسیده بـه دهانه‌ی نورگیری که با زاویه‌ی ۳۰ درجه نسبت به افـق قـرار دارد، نـسبت بـه حالـت افقـی در عـرض‌هـای جغرافیایی مختلـف بـرای دو حالـت سـطوح B1 و B2 شیشه و دیوار آمده است:

جدول ٤ میزان کاهش ضریب روشنایی نورگیر با شیب ۳۰ درجه نسبت به حالت نورگیر افقی

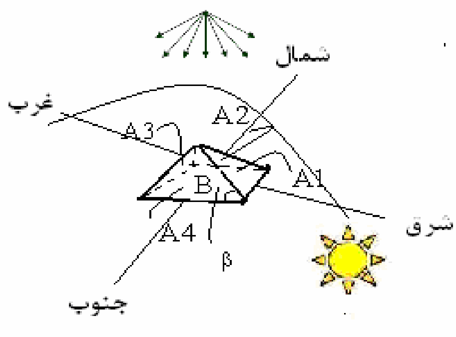
عرض جغرافیایی	٦۰	٥۰	٤۰	۳۰	۲۰	۱۰
میزان کاهش ضریب روشنایی-سطوح B1 و B2 شیشه	٪۱۱	٪۱۲	٪۱٤	٪۱٥	٪۲۰	٪۲۲
میزان کاهش ضریب روشنایی- سطوح B1 و B2 دیوار با $\rho = 0.8$	٪۱۳	٪۱۳	٪۱٥	٪۱۸	٪۲۲	٪۲۳

حالت سوم- وضعیت کلاهک نورگیر در حالت سوم در شکل ۲۲ نشان داده شده است:



شکل ۲۲ شماتیکی از کلاهک نورگیر(حالت سوم)

در شکل (۲۳) وضعیت صفحات نورگیر نسبت به جهت حرکت خورشید و مشخصه‌های نور مستقیم و پخشی آمده است:



شکل ۲۳ شمائی از وضعیت کلاهک با شدت نور مستقیم و پخشی

در این حالت برای کلیه سطوح کلاهک، شیشه با ضریب عبور ۰/۷ در نظر گرفته شده است. محاسبات در این حالت هم مؤید نتایج قبلی است؛ به این ترتیب که در نظر گرفتن شیب برای کلاهک، باعث کاهش میزان نور رسیده به دهانه‌ی ورودی نورگیر می‌شود و حالت افقی آن بیشترین میزان نور را هدایت می‌کند. در جدول (٥)، درصد میزان کاهش ضریب روشنایی کلاهک شیب‌دار با شیب ۳۰ درجه در این حالت نسبت به حالت کلاهک افقی نظیر آن آمده است:

جدول ٥ میزان کاهش ضریب روشنایی نورگیر با شیب ۳۰ درجه نسبت به حالت نورگیر افقی

عرض جغرافیایی	٦۰	٥۰	٤۰	۳۰	۲۰	۱۰
میزان کاهش	٪۹	٪۱۰	٪۱۱	٪۱۳	٪۱٤	٪۱٥

این نتیجه به این ترتیب قابل توجیه است که میزان نوری که در هنگام ظهر وارد نورگیر می‌شود، به علت ارتفاع بالاتر تراز خورشید به مراتب بیشتر از مواقع دیگر طول روز است. با توجه به معیار بررسی این تحقیق که بیشترین میزان نور در طی سال است، در نتیجه مقدار نوری که در زمان‌های نزدیک ظهر به داخل نورگیر می‌رسد، نقش اصلی را بازی می‌کند. اگر سطوحی که نور به آن‌ها می‌رسد شیب‌دار باشند، هم باعث انحراف نور به سمت بیرون شده و هم این‌که به علت زاویه‌ی دید کم‌تر، نور انعکاسی کم‌تری از آن به دهانه‌ی ورودی می‌رسد. البته شایان ذکر است که در هر

نقطه‌ی انتخاب شیب کلاهک معادل با عرض جغرافیایی آن محل، بیشترین میزان نور مستقیم را به سطح عمود بر پرتو خورشید کلاهک می‌رساند و انتظار می‌رفت در این زاویه بیشترین میزان نور به دهانه ورودی نورگیر برسد؛ ولی به علت وضعیت انعکاسی شیشه‌ها و انحراف نور به سمت بیرون و کاهش زاویه‌ی دید مؤثر روشنایی در انتقال نور به دهانه، این نتیجه حاصل نمی‌شود؛ البته همان‌طور که در ادبیات موضوع ذکر شد، اخیراً این نتیجه توسط فریوان و همکاران [4] با استفاده از آزمایش با مدل و روش رادیانس به دست آمده است که در این تحقیق با روشی دیگر نیز گزارش می‌شود.

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یک ساختمان چهار طبقه برای محاسبات روشنایی در نظر گرفته شد. از روش رادیوسیتی برای محاسبات روشنایی استفاده شد. محاسبات روشنایی بر اساس ضریب روشنایی و برای سه وضعیت چاه روشنایی سه‌طرفه، چهارطرفه و نورگیر در گوشه انجام شد.

نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که ضلع نورگیر،تأثیر بسزایی در میزان نوری که وارد طبقات ساختمان می‌شود دارد؛ به این ترتیب که برای یک نورگیر مربعی، با کاهش شاخص چاه (افزایش ضلع نورگیر)، میزان ضریب روشنایی به صورت نمائی افزایش می‌یابد. تأثیر ضریب انعکاس دیوار نورگیر در ضریب روشنایی طبقات، از دیگر مقوله‌های مورد بررسی در این تحقیق بود. نتایج نشان می‌دهد که میزان تأثیر ضریب انعکاس در ابعاد کوچکتر نورگیر و در طبقات پایین‌تر، بیشتر بوده و این افزایش به صورت نمائی است.

از دیگر موارد مورد بررسی در این تحقیق، تأثیر ضریب انعکاس کف نورگیر بود. نتایج نشان می‌دهد که تأثیر ضریب انعکاس کف نورگیر در میزان ضریب روشنایی، در طبقات پایین‌تر و در ابعاد بزرگتر نورگیر، بیشتر است. پارامتر دیگری که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت، ابعاد نورگیر بود. نتایج حاکی از آن است که از میان نورگیرهای مستطیلی با سطح مقطع یکسان، حالت مربعی، بیشترین میزان نور را وارد طبقات ساختمان می‌کند. برای نورگیر سه طرفه، بر خلاف نورگیر چهارطرفه، میزان افزایش ضریب روشنایی اتاق‌ها با افزایش ضریب انعکاس دیواره چاه، در همه‌ی ابعاد نورگیر، تقریباً ثابت است؛ دیگر آن که تأثیر ضریب انعکاس دیواره‌ی چاه در افزایش ضریب روشنایی در اتاق‌های پشتی از اتاق‌های کناری بیشتر است.

محاسبات برای سه نوع وضعیت کلاهک نورگیر نشان داد که شدت روشنایی کلی (نور مستقیم و نور پخشی) که به داخل نورگیر می‌رسد، با انتخاب کلاهک شیب‌دار نسبت به حالت کلاهک تخت (حالت افقی) کاهش می‌یابد و انتخاب کلاهک نورگیر افقی نسبت به حالت شیب‌دار، نور بیشتری را انتقال می‌دهد.

فهرست علائم و نشانه‌ها

حروف انگلیسی

زاویه‌ی سمت	A
ضریب روشنایی	DF
شدت روشنایی	E
ضریب دید	F_{ij}
رادیوسیتی	J
شدت نور مستقیم	I_b
شدت نور پخشی	I_{sky}
شدت تشعشع	q
شاخص چاه	wi
ابعاد نورگیر	W,L,H

حروف یونانی

ضریب صدور	ε
زاویه‌ی ساعت	ω

شیب کلاهک نورگیر	β	و بردار یکه عمود بر سطح نورگیر	
زاویه‌ی انحراف زمین	δ	زاویه‌ی سمت الرأس	θ_s
ضریب انعکاس کف	ρ_f	ضریب عبور شیشه	τ_g
ضریب انعکاس دیوار	ρ_w	عرض جغرافیایی	ϕ
زاویه‌ی بین بردار شعاع مرکزی خورشید	θ_i	زاویه‌ی سمت نورگیر	γ

مراجع

1. Kristl Z., Krainer A., "Light wells in residential building as a complimentary daylight source", *Journal of Solar Energy*, 65, pp. 197-206,(1998).
2. Leslie, R. P.," Capturing the daylight dividend in building: why and how?", *Journal of Building & Environment*, 38, pp. 381-385,(2003).
3. Ochoa, C. E., Capelute, I.G., "Evaluating visual comfort and performance of three natural lighting systems for deep office buildings in highly luminous climates", *Journal of Building & Environment*, 41, pp. 1128-1135,(2006).
4. Freewan, A. A., Shao, L., Saffa, R., "Interactions between louvers and ceiling geometry for maximum daylighting performance", *Journal of Renewable Energy*, 34, pp. 223-232, (2009).
5. Cole R. J., "The effect of the surface enclosing atria on the daylight in adjacent spaces", *Journal of Building & Environment*, 25, pp.37-42, (1990).
6. Al-Turki I., Schiler M.," Predicting natural light in atria and adjacent spaces using physical models", *Journal of Solar Energy* , 59, pp. 241-245, (1998).
7. Littlefair P.,"Daylight prediction in atrium buildings", *Journal of Solar Energy*, 73, pp. 105-109,(2003).
8. Calcagni B., Paroncini M.,"Daylight factor prediction in atria building designs", *Journal of Solar Energy*, 76, pp. 669-682,(2004).
9. Samant S., Medjdoub B.,"Reflectance distributions and atrium daylight levels: a comparison between physical scale model and radiance simulated study", School of the built environment, University of Nottingham, UK,(2005).
10. Papapanagiotou I., "Assessing alternative ways to provide daylight in a storehouse by using Radiance", A thesis submitted for the degree of Master of Science, Mechanical Engineering Department, University of Strathclyde in Glasgow, (2001).
11. Modest M. F., *"Radiative Heat Transfer"*, McGraw-Hill, Inc. , New York, (1993).

12. Lehar M. A., Glicksman L. R., "Rapid algoritm for modeling daylight distributions in office buildings", *Journal of Building & Environment*, 42, pp. 2908-2919,(2007).
13. Laouadi A. & Atif M. R., "Daylight Availability in Top-lit Atriuams: Prediction of Skylight Transmittance and Daylight Factor", *International Journal of Lighting Research and Technology*, 32(4), pp. 175-186, (2000).

١٤.رئوفی راد؛ مجید، طراحی سیستم‌های خورشیدی ساختمان در ایران، شرکت بهینه سازی مصرف سوخت، ۱۳۸۵، فدک ایساتیس، تهران.

15..http://www.me.utexas.edu/~howell/sectionc/C-1.html.